

Бурцев И.И., аспирант

Научный руководитель Иванов В.Э., проф., д-р техн. наук

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ УЗЛОВ СВЧ АППАРАТУРЫ ЦИФРОВЫХ РРЛ

СВЧ тракт приёмопередающей аппаратуры РРЛ в силу наличия в нём активных полупроводниковых элементов с характерной ВАХ в общем случае обладает существенной нелинейностью. Принципиально нелинейными устройствами являются генераторы и смесители. Усилители могут работать как в линейном, так и в нелинейном режиме. Нелинейность такого рода (не касаясь нелинейности фазово-частотной и амплитудно-частотной характеристик, вызываемых в том числе и пассивными устройствами) делает невозможным или сильно затрудняет функционирование аппаратуры в режиме квадратурно-амплитудной модуляции (КАМ, QAM), отчего имеет место параллельный выпуск двух разных классов устройств для СВЧ тракта. Особенно сильно отличаются конструкции линейных и нелинейных усилителей.

КАМ, ТВ-АМ, HPSK-CDMA – классы сигналов, чувствительных к НЛ искажениям. В радиолокации и спутниковой связи вообще не используют методы модуляции с изменением амплитуды огибающей, поскольку уровень искажений в эфире заведомо высок.

Модуляция с постоянной огибающей, будучи устойчивой к помехам в эфире и энергетически выгодной, имеет сравнительно низкую информационную эффективность. Система с фазовой модуляцией 8PSK способна вести передачу синхронного потока STM-0 по существующим частотным планам (28 МГц на канал). Допустим, что относительно небольшие масса, габариты, а также стоимость и уровень потребления энергии передатчиком позволили разместить аппаратуру на два идентичных ствола РРЛ, работающие на одной частоте, но с разной поляризацией. Однако один ствол РРЛ уровня STM-1 (155 МБит/с) на 30% превосходит по полезной нагрузке эти два ствола уровня STM-0, а сигналы STM-1 могут передаваться только с модуляцией КАМ16 и выше. Фактически магистральные аналоговые РРЛ, передающие цифровые потоки, используют методы модуляции 4PSK (до 34 МБит/с) в связи с отсутствием до последнего времени на рынке как самой аппаратуры 8PSK, так и опыта её применения, а также общими сложностями эксплуатации синхронных сетей.

Можно сделать вывод о выборе в пользу модуляции КАМ для передачи информационных потоков с максимальной нагрузкой. Они предъявляют специфические требования к качеству тракта СВЧ. Показатели, характеризующие линейность – уровень сжатия (компрессии) P_{1dB} , точка пересечения с интермодуляционными продуктами 3 порядка OIP3. Так, для 16КАМ максимальное усиление должно быть на 12 дБ ниже точки OIP3, для 128КАМ – на 17 дБ. Это заставляет использовать лишь небольшой линейный участок ВАХ; усилители делают многокаскадными (4...8 мощных полевых транзистора, близких к отечественным ЗП915).

Комплект аппаратуры ствола цифровой РРЛ плезियोхронной иерархии потребляет не более 60 Вт вместе с модемом. Потребляемая мощность усилителя передатчика синхронной РРЛ может достигать 100 Вт. Причина – невысокий КПД полевых транзисторов на линейном участке ВАХ (режим А, предельный КПД 50%): практически он не превышает 9%, а в режиме с насыщением достигает 20%. Линейные регуляторы напряжения в схемах питания ещё более ухудшают КПД аппаратуры связи.

Выбор элементной базы и конструктивных решений очень важен. Нормальный теплоотвод обеспечивают только транзисторы в металлокерамических корпусах наряду с их размещением на массивных металлических радиаторах. В результате передатчик K3171 фирмы Siemens при выходной мощности 2 Вт имеет массу 20 кг, а длина корпуса близка к 1 м. Передатчик Tx TRP150 фирмы NEC при меньших в 2 раза габаритах и массе 12 кг имеет очень сильный нагрев (поверхность горячая на ощупь). Очевидно, что узлы тракта СВЧ, отвечающего требованиям, весьма недёшевы.

Тщательный расчёт выделяемой мощности в цепях питания РЭА проводится при конструировании сотовых телефонов, где важно повысить срок работы батареи. Снижать потребление энергии мощной РЭА следует в первую очередь для обеспечения минимально напряжённого теплового режима для её безотказного функционирования. Пригодился бы универсальный программный комплекс расчёта теплового поля. На сайте компании National Semiconductor есть весьма удобная программа, однако она оперирует только с компонентами собственного производства.

Малощумящие усилители приёмников также имеют низкий КПД, однако абсолютное потребление ими энергии невелико.

Логично вообще исключить из тракта СВЧ те устройства усилитель передатчика (УСВЧ), для которого сложно обеспечить линейный режим работы. Схема, в которой промодулированный сигнал с выхода смесителя уже не усиливается, реальна, если в гетеродине применяется достаточно мощный транзистор, возможно, с дополнительным каскадом усиления перед смесителем. В этом случае смеситель передатчика, становясь окончательным узлом ВЧ тракта, становится критически важным с точки зрения энергетики РРЛ. Его конструкция должна позволять оперировать с мощным сигналом, что требует подбора специфических компонентов. Например, смеситель может быть построен на мощных варакторах, требующих особого внимания к возможной нестабильности при мощности, равной единицам ватт. Для сравнения, малосигнальные смесители работают с опорным сигналом гетеродина, равным 6 дБм и выполняются на диодах Шоттки.

Однако потери в фидере и особенно в смесителе довольно велики. Смеситель, построенный как балансный варакторный преобразователь, имеет КПД по гетеродину до 20% и применяется уже четверть века. В передатчике КУРС-4 с гетеродином 3 Вт мощность выходного сигнала смесителя (фактически, мощность передатчика) достигает 750 мВт, что является разрешённым пределом для большинства РРЛ. Эффективность преобразования можно довести до 30%, обеспечив возврат к варакторам побочных составляющих ПФ.

В настоящее время на кафедре ТиСС разрабатываются гетеродины для аппаратуры РРЛ диапазона от 8 до 16 ГГц с мощностью свыше 0,5 Вт и системой АПЧ с делителем частоты.

Здесь необходимо отметить, что исключение МШУ из приёмника, с одной стороны, проблематично из-за низкого уровня принимаемого из эфира сигнала (на протяжённых трассах), с другой – не принесёт желаемого сокращения массы и габаритов аппаратуры из-за низких, в целом, абсолютных показателей энергопотребления.

Другим путём может быть применение в системах с КАМ16 двухтактных схем усиления с предельным КПД 78%, где транзисторы работают в режиме АВ, усиливая каждый одну полуволну ВЧ колебания. Они уже используются в выходных каскадах ТВ-передатчиков амплитудно-модулированного сигнала, требовательного к НЛ. Передатчики ТВ на биполярных транзисторах обеспечивают выходную мощность более чем 100 Вт с коэффициентом нелинейности не более 4% на фоне отсутствия чётных гармоник преобразования. Будет полезной теория применения мощных полевых транзисторов в двухтактных усилителях СВЧ, в особенности способ задания точного смещения на паре транзисторов, имеющих различную крутизну ВАХ.

Внедрение систем STM-QAM тормозится не только из-за сложности аппаратуры СВЧ, но и недостаточного развития инфраструктуры синхронных сетей. Было бы ошибкой отказываться в РРЛ от модуляции с постоянной огибающей. Современная элементная база в нелинейном тракте СВЧ наряду с модуляцией 8PSK позволяет создавать недорогую и весьма компактную аппаратуру связи вплоть до уровня STM-0. Например, передатчик РРЛ КУРС-4 производства НПФ МОКОН имеет массу немногим более 3 кг.

В системах фиксированной связи с кодовым разделением каналов CDMA неравномерность огибающей ВЧ сигнала возникает из-за сложной формы канальной комбинации; отношение пиковой и средней мощности составляет от 3 до 12 дБ. Нелинейность опасна из-за появления интермодуляционных составляющих высокого порядка в смежных частотных каналах. Применяют линейризацию проходной амплитудной характеристики усилителей (довольно мощных) базовых станций при помощи адаптивного или фиксированного нелинейного фильтра предискажений.